

АНАЛИЗ НА КОНВЕРТИРАН ЕЛЕКТРОМОБИЛ В ДИНАМИЧНИ РЕЖИМИ

Васил Димитров, Атанас Николов
vdimitroff@vtu.bg, atanas.p.nikolov@abv.bg

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“
София, ул. Гео Милев № 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** електромобил, пробег, ефективност, динамични режими*

***Резюме:** В доклада е разгледан конвертиран електрически автомобил Ауди А2 3L, лек и аеродинамичен модел, за който е избран подходящ асинхронен двигател, изчислен е пробегът при различни предавки и скорост на движение за два вида батерии. Проведен е анализ на четири динамични режима на ускорение на електромобила, като е изчислено ускорението с превключване на предавките при две различни честоти на въртене на АД и два режима на ускорение без смяна на предавката. На основата на изследванията на пробегата и динамиката може да се оптимизира начинът на използване на скоростната кутия или тя да бъде заменена с редуктор с подходящо предавателно число. Методиката, представена в доклада, може да се използва при конвертиране на автомобили в електрически - както за избор на подходящ автомобил и електрозадвижване, така и за оптимизиране на механичната част на електромобила, за получаване на повишена енергийна ефективност, висока надеждност при експлоатация и съответствие с изискванията за електромагнитна съвместимост, съгласно съвременните IEC стандарти.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Във връзка с екологичните проблеми и развитието на технологиите електрическата мобилност е все по-популярна и достъпна. При конвертиране на автомобили с двигател с вътрешно горене в електрически предпочитано решение е използването на асинхронен тягов двигател (АД). Той е по-лек, по-евтин, по-опростен, по-надежден и по-безопасен при работа в сравнение с постояннотоковия, не се нуждае от специална поддръжка [1-4]. Съвременните контролери на основата на IGBT инвертират постоянното напрежение на акумулаторната батерия и регулират честотата и амплитудата на полученото трифазно променливо напрежение за захранване и плавно енергийно-ефективно управление на скоростта на въртене и въртящия момент на АД. Получава се механична характеристика, подходяща за управление на превозно средство, осигуряваща ефективна работа на двигателя в различните режими [5, 6].

В доклада са изследвани динамични режими на конвертиран електромобил Audi А2. Моделът е избран въз основа на проведен сравнителен анализ на четири серийно произведени автомобили, заради малката маса m (855 kg при празен автомобил; 925 kg с шофьор; 1245 kg при пълен автомобил) и много ниския коефициент на

аеродинамично съпротивление ($C_x = 0,25$), с цел минимизиране разхода на енергия и реализиране на по-голям пробег с едно зареждане на батерията [7]. С тези параметри изчислената необходима мощност на електродвигателя при скорост $v = 90 \text{ km/h}$ е 12 kW . С необходимия резерв е избран АД тип HPQ15-96HM с номинална мощност 15 kW , проектиран за честотно управление [7, 8]. Двеминутната мощност е 30 kW – за ускорение и изкачване на наклони. Двигателят е предназначен специално за монтаж в електромобили – характеризира се с висока надеждност при експлоатация, дълъг междуремонтен срок, повишена ефективност и ниски нива на шум. С избрания електродвигател е изчислен пробегът на електромобила с пълен полезен товар в зависимост от скоростта и предавката при използване на литиево-йонна батерия с капацитет 15 kWh (табл.1). Там, където липсват данни, се превишава максималната честота на въртене на двигателя - на предавка 1, или номиналния въртящ момент - на предавки 4 и 5. Изчисленият пробег с пълен полезен товар е около 100 km при скорост 90 km/h и около 160 km при 50 km/h . За по-голям пробег на електромобила може да се постави батерия с капацитет 25 kWh . Тогава пробегът при 90 km/h е около 170 km , а при 50 km/h - 260 km . За да не се превиши пълната маса на автомобила с по-тежката батерия, трябва да се намали полезният товар с 60 kg .

Табл. 1. Пробег на конвертиран Audi A2 3L с батерия с капацитет 15 kWh

предавка	Пробег в km при скорост на движение от 10 km/h до 100 km/h									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	136	131	160	158	154	-	-	-	-	-
2	164	184	173	164	157	150	136	117	103	91
3	191	197	183	182	159	148	130	113	103	92
4	192	200	188	182	165	152	130	112	101	-
5	191	197	185	172	165	152	130	-	-	-

Вижда се, че в работния диапазон на предавки 4 и 5 пробегът не се различава съществено от предавка 3. Предавките, които оползотворяват мощността на двигателя и покриват скоростния диапазон от 0 до 100 km/h , са 2 и 3, като при по-ниска скорост (до около 50 km/h) на предавка 3 се реализира по-голям пробег, а над тази скорост разликата не е съществена.

ДИНАМИЧЕН РЕЖИМ

Времето за ускорение на електромобила е [3, 9]:

$$(1) \quad t = \frac{v}{a}, \text{ s},$$

където: v е скорост, m/s ; a - ускорение, m/s^2 .

Ускорението a е пропорционално на приложената сила F_a и обратно пропорционално на масата m на електромобила [9]:

$$(2) \quad a = \frac{F_a}{m}$$

При ускорение на електромобила с нарастването на скоростта v се увеличава и съпротивлението при движение F_c , включващо въздушното съпротивление F_e и съпротивлението от търкаляне F_f . Така все по-малка част от движещата сила F_k , създавана от въртящия момент на двигателя, остава за ускоряващата сила F_a след изваждане на F_c [9]:

$$(3) \quad F_a = F_k - F_c = F_k - (F_f + F_e)$$

Също така, максимално ускорение се извършва с максималния, критичен момент на АД до достигане на критичната честота на въртене, след което моментът намалява с нарастването честотата на въртене, съответно намалява и ускоряващата сила. Освен

това тя намалява и на всяка следваща предавка, ако те се превключват възходящо при ускорението.

С отчитане на намаляващата ускоряваща сила и съответно намаляващото ускорение, времето t_{0100} за ускорение от 0 до 100 km/h е изчислено, като нарастването на скоростта се разделя на 10 скоростни интервала (по 10 km/h), за всеки от които се намира времето за ускорение и след това те се сумират:

$$(4) \quad t_{0100} = t_{010} + t_{1020} + \dots + t_{8090} + t_{90100}$$

По този начин се получават данни и за ускоренията до скоростите кратни на 10. За всеки от тези интервали се намира средното ускорение, пропорционално на средната ускоряваща сила:

$$(5) \quad a_{010} = \frac{F_{a010}}{m}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$a_{90100} = \frac{F_{a90100}}{m}$$

Средната ускоряваща сила се изчислява, като се взема средно аритметичната стойност на силите в началото и в края на интервала:

$$(6) \quad F_{a010} = F_k - 0,5(F_{c0} + F_{c10}) = F_k - 0,5((F_{f0} + F_{b0}) + (F_{f10} + F_{b10}))$$

$$\dots\dots\dots$$

$$F_{a90100} = F_k - 0,5(F_{c90} + F_{c100}) = F_k - 0,5((F_{f90} + F_{b90}) + (F_{f100} + F_{b100}))$$

В таблици 2, 3, 4 и 5 са изчислени усреднените въртящи моменти на АД за съпротивление и за ускорение ($M_{c.ср}$ и $M_{уск.ср}$), средните ускорения ($a_{ср}$) и получените времена за ускорение от 0 до 100 km/h и до кратна на 10 km/h скорост, само с шофьор и с пълен товар, за четири динамични режима на ускорение на електромобила - два с превключване на предавките, съответно при $n_{АД} = 3000$ rpm и 6000 rpm и два без превключване - само на втора и само на трета предавка. В табл. 6 и на фиг. 1 са сравнени времената, получени в четирите режима само с шофьор. Според резултатите от изчисленията най-добро ускорение се получава при използване на скоростната кутия и превключване на предавките при честота на въртене на АД $n_{АД} = 3000$ rpm, за разлика от ДВГ, където е нужна висока честота на въртене за получаване на максимален въртящ момент и мощност. Ако електромобилът се ускорява само на една предавка, то при ниските скорости до 50 km/h втората предавка има по-добро ускорение от трета. При по-високата скорост над 50 km/h и особено над 80-90 km/h ускорението е по-голямо на трета предавка, на втора то много намалява с намаляването на въртящия момент на електродвигателя при висока честота на въртене.

Табл. 2. Динамичен режим на конвертиран Audi A2 3L с превключване ($n_{АД} = 3000$ rpm)

ΔV [km/h] предавка		Мс.ср. [N.m]		Муск.ср. [N.m]		а _{ср} [m/s ²]		t [s]	
		шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен
0 - 10	1	1,89	2,53	146,63	145,99	6,20	4,58	0,45	0,61
0 - 20	1	2,88	3,84	145,64	144,68	6,16	4,54	0,90	1,22
0 - 30	1	3,31	4,37	145,21	144,15	6,14	4,53	1,36	1,84
0 - 40	1 2	4,50	5,87	144,02	142,65	5,44	4,01	2,39	3,17
0 - 50	1 2	5,41	6,96	137,84	136,30	4,89	3,60	3,41	4,59
0 - 60	1 2 3	7,34	9,26	136,79	134,88	4,39	3,23	5,08	6,81
0 - 70	1 2 3	9,14	11,34	135,62	133,42	4,03	2,96	6,57	8,89
0 - 80	1 2 3	10,98	13,44	137,54	127,91	3,70	2,71	8,62	11,78
0 - 90	1 2 3	12,87	15,58	122,59	119,89	3,38	2,47	11,81	16,42
0 - 100	1 2 3	14,82	17,74	115,08	112,17	1,75	1,24	15,85	22,49

Табл. 3. Динамичен режим на конвертиран Audi A2 3L с превключване ($n_{AD} = 6000 \text{ rpm}$)

ΔV [km/h]	предавка	Мс.ср. [N.m]		Муск.ср. [N.m]		а _{ср} [m/s ²]		t [s]	
		шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен
0 - 10	1	1,89	2,53	146,63	145,99	6,20	4,58	0,45	0,61
0 - 20	1	2,88	3,84	145,64	144,68	6,16	4,54	0,90	1,22
0 - 30	1	3,31	4,37	145,21	144,15	0,63	4,53	1,36	1,84
0 - 40	1	4,50	5,87	125,22	123,85	5,29	3,89	2,57	3,45
0 - 50	1	5,41	6,96	110,58	109,04	4,67	3,42	3,83	5,22
0 - 60	1 2	7,34	9,26	103,11	101,19	4,16	3,04	5,80	7,95
0 - 70	1 2	9,14	11,34	95,87	93,67	3,74	2,73	8,02	11,18
0 - 80	1 2	10,98	13,44	89,54	86,67	3,40	2,47	10,79	15,34
0 - 90	1 2	12,87	15,58	82,38	79,68	3,10	2,24	14,89	21,93
0-100	1 2	14,82	17,74	75,70	72,78	1,24	0,76	22,37	36,58

Табл. 4. Динамичен режим на конвертиран Audi A2 3L – само втора предавка

ΔV [km/h]	предавка	Мс.ср. [N.m]		Муск.ср. [N.m]		а _{ср} [m/s ²]		t [s]	
		шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен
0 - 10	2	1,89	2,53	148,21	147,57	3,54	2,62	0,79	1,06
0 - 20	2	2,88	3,84	147,22	146,26	3,51	2,59	1,58	2,14
0 - 30	2	3,31	4,37	146,79	145,73	0,36	2,58	2,38	3,22
0 - 40	2	4,50	5,87	145,60	144,23	3,48	2,56	3,40	4,54
0 - 50	2	5,41	6,96	139,37	137,82	3,33	2,44	4,41	5,94
0 - 60	2	7,34	9,26	124,73	122,82	2,98	2,18	6,87	9,42
0 - 70	2	9,14	11,34	114,52	112,31	2,73	1,99	9,06	12,59
0 - 80	2	10,98	13,44	137,54	103,07	2,52	1,83	11,79	16,68
0 - 90	2	12,87	15,58	97,03	94,33	2,32	1,67	15,80	23,10
0 - 100	2	14,82	17,74	88,93	86,01	1,21	0,75	23,04	37,09

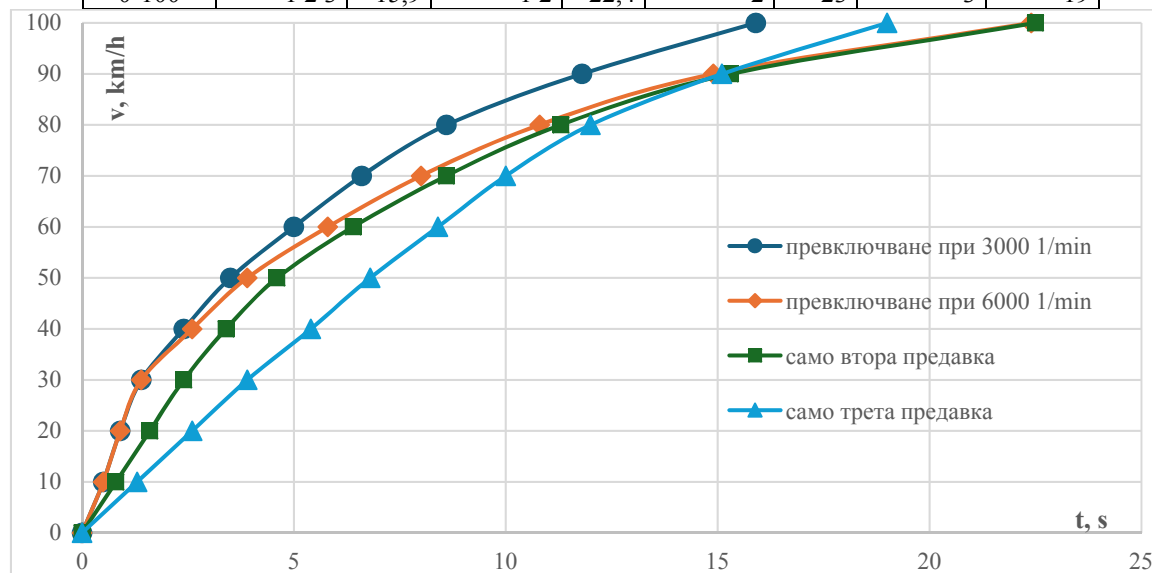
Табл. 5. Динамичен режим конвертиран Audi A2 3L - само трета предавка

ΔV [km/h]	предавка	Мс.ср. [N.m]		Муск.ср. [N.m]		а _{ср} [m/s ²]		t [s]	
		шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен	шофьор	пълен
0 - 10	3	1,89	2,53	148,21	147,57	2,14	1,59	1,30	1,75
0 - 20	3	2,88	3,84	147,22	146,26	2,13	1,57	2,61	3,54
0 - 30	3	3,31	4,37	146,79	145,73	2,12	1,57	3,93	5,32
0 - 40	3	4,50	5,87	145,60	144,23	2,10	1,55	5,48	7,38
0 - 50	3	5,41	6,96	144,69	143,14	2,09	1,54	6,84	9,24
0 - 60	3	7,34	9,26	142,76	140,84	2,06	1,51	8,49	11,44
0 - 70	3	9,14	11,34	140,96	138,76	2,04	1,49	9,96	13,49
0 - 80	3	10,98	13,44	137,54	132,74	1,95	1,43	11,99	16,34
0 - 90	3	12,87	15,58	126,99	124,29	1,84	1,33	15,12	20,91
0-100	3	14,82	17,74	119,13	116,21	1,45	1,03	19,10	26,85

Табл. 6. Сравнение динамични режими конвертиран Audi A2 3L само с шофьор

ΔV , km/h	превключване на предавките				без превключване на предавките			
	$n_{AD} = 3000 \text{ rpm}$		$n_{AD} = 6000 \text{ rpm}$					
	предавки	t, s	предавки	t, s	предавка	t, s	предавка	t, s
0-10	1	0,5	1	0,5	2	0,8	3	1,3
0-20	1	0,9	1	0,9	2	1,6	3	2,6
0-30	1	1,4	1	1,4	2	2,4	3	3,9

0-40	1 2	2,4	1	2,6	2	3,4	3	5,5
0-50	1 2	3,4	1	3,9	2	4,4	3	6,8
0-60	1 2 3	5,1	1 2	5,8	2	6,9	3	8,5
0-70	1 2 3	6,6	1 2	8	2	9,1	3	10
0-80	1 2 3	8,6	1 2	10,8	2	11,8	3	12
0-90	1 2 3	11,8	1 2	14,9	2	15,8	3	15,1
0-100	1 2 3	15,9	1 2	22,4	2	23	3	19



Фиг. 1. Динамични режими конвертиран Audi A2 3L само с шофьор

Общото време за ускорение от 0 до 80 – 90 km/h е сходно на двете предавки, но от 0 до 100 km/h е значително по-добро на трета предавка. На базата на тези резултати, ако скоростната кутия се замени с редуктор, то оптималното предавателно число за получаване на равномерно ускорение в целия скоростен диапазон от 0 до 100 km/h е между предавателните числа на втора и трета предавка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е разгледан конвертиран електрически автомобил модел Ауди А2, избран като лек и аеродинамичен, за който е изчислен пробегът при различни предавки и скорост на движение за два вида батерии. Проведен е анализ на четири динамични режима на ускорение на електромобила, като е изчислено ускорението с превключване на предавките при две различни честоти на въртене на АД и два режима на ускорение без смяна на предавката. На основата на изследванията на пробегата и динамиката може да се оптимизира начинът на използване на скоростната кутия. Според получените резултати при скорост до 50 km/h за икономично изразходване енергията на батерията и съответно удължаване пробегата на електромобила е оптимална трета предавка, а при нужда от по-добро ускорение – втора. Над 50 km/h от гледна точка на пробегата няма съществена разлика между втора и трета предавка, но като се вземат предвид ускоренията, оптимална е трета предавка. Запазването на скоростната кутия при конверсията на автомобила позволява да се увеличи обхватът на въртящ момент и скорост на задвижващите колела и да се оптимизира режимът на асинхронния двигател. Принципно обаче, АД с векторно управление не се нуждае от скоростна кутия, която също така добавя маса и механични загуби, изисква манипулация при шофиране, може да има нужда от обслужване. Ако бъде взето решение за замяната на скоростната кутия с редуктор, то в общия случай подходящото предавателно число според получените резултати за пробегата и ускоренията би било между втора и трета предавка, за добра

икономичност и равномерно ускорение под и над 50 km/h, а според конкретните условия на експлоатация следва да се има предвид как предимно ще се използва електромобилът – дали в града или извън него, само с шофьор или натоварен, наклоните, които трябва да преодолява. Методиката, представена в доклада, може да се използва при конвертиране на автомобили в електрически - както за избор на подходящ автомобил и електрозадвижване, така и за оптимизиране на механичната част на електромобила, за получаване на повишена енергийна ефективност, висока надеждност при експлоатация и съответствие с изискванията за електромагнитна съвместимост съгласно съвременните IEC стандарти.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bakshi U., M. Bakshi, Electrical Drives and Control, Technical Publications Pune, India, 2009
- [2] Hughes A., Electric Motors and Drives – Fundamentals, Types and Applications, Third edition, Elsevier Ltd., 2006
- [3] Евтимов И., Р. Иванов, Електромобили, Русе, 2016
- [4] Larminie J., J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley&Sons Ltd., England, 2003
- [5] Рац Е., Векторно управление на електрически машини, Авангард-Прима, С., 2010
- [6] Makedonski N., Parameters estimation of the full equivalent circuit of an induction motor, by using simple measurements and covariance matrix adaptation evolution strategy, 11th Sc. Conf. BulEF 2019, DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030706, 2019
- [7] Dimitrov V., A. Nikolov, Design and energy analysis of a converted electric car, Int. Sc. Conf. “UiTech - 2023”, Proceedings, pp. I-126 – I-132, 2023
- [8] Induction motor type HPQ15-96HM – Technical specification, Foshan Shunde Green Motor Technology Co. Ltd, China, 2023
- [9] Българанов Л., Електрически транспорт, София, 2009

ANALYSIS OF A CONVERTED ELECTRIC CAR IN DYNAMIC MODES

Vasil Dimitrov, Atanas Nikolov
vdimitroff@vtu.bg, atanas.p.nikolov@abv.bg

Todor Kableshkov University of Transport – Sofia
158 "Geo Milev" Str., Sofia,
THE REPUBLIC OF BULGARIA

Key words: *electric car, mileage, efficiency, dynamics*

Abstract: *The report examines a converted electric car Audi A2, a light and aerodynamic model, for which a suitable induction motor was selected, the range at different gears and driving speed is calculated for two types of batteries. An analysis of four dynamic acceleration modes of the electric car was carried out, calculating the acceleration with gear shifting at two different induction motor rotation frequencies and two acceleration modes without gear shifting. Based on mileage and dynamics studies, the way of the gearbox using can be optimized, or it can be replaced with a reducer an appropriate gear ratio. The methodology presented in the report can be used when converting cars to electric, both for choosing a suitable car and electrical drive, and for optimizing the mechanical part of the electric car, to obtain increased energy efficiency, high operational reliability and compliance with the requirements for electromagnetic compatibility, according to modern IEC standards.*